李苗源, 廖红梅. 适用于吞咽障碍人群的低脂、高纤维、高蛋白软凝胶的研制 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 97−106. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030074

LI Miaoyuan, LIAO Hongmei. Development of Low Fat, High Fiber and High Protein Soft Gel Suitable in Dysphagia-friendly Food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 97−106. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030074

· 研究与探讨 ·

适用于吞咽障碍人群的低脂、高纤维、高蛋白软凝胶的研制

李苗源, 廖红梅*

（江南大学食品学院, 江苏无锡 214122）

摘　要: 为了改善吞咽障碍人群营养不良的现状，本研究以乳清蛋白、微晶纤维素、葵花籽油为主要原料，结冷胶和魔芋胶为辅料，采用热诱导法制备了低脂、高纤维、高蛋白的软凝胶。采用质构分析、流变学测试和结构表征多种方法系统分析了凝胶的物理性能，并基于国际吞咽障碍饮食标准（International Dysphagia Diet Standardization Initiative，IDDSI）评估了其作为吞咽障碍人群专用食品的应用潜力。结果表明：以 4%~8% 乳清蛋白、2%~6% 微晶纤维素、1%~3% 葵花籽油、2% 多糖（结冷胶与魔芋胶复配）的配方所制备的软凝胶表现出良好的成型性、表面光泽度和冷冻-复热耐受性，该软凝胶符合 IDDSI 4 级要求。在此基础上增加微晶纤维素至 4%~6% 时，较大量微晶纤维素和葵花籽油通过氢键填充在多糖凝胶网络中，凝胶更加柔软光滑，容易吞咽。综上，本研究制备的低脂、高纤维、高蛋白软凝胶可为吞咽障碍人群提供全新的膳食供给方案，具有良好的应用潜力。

关键词: 吞咽障碍, 结冷胶, 魔芋胶, 低脂高纤维高蛋白, 软凝胶, 冷冻-复热

中图分类号: TS201.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0097−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030074　　本文网刊:

Development of Low Fat, High Fiber and High Protein Soft Gel Suitable in Dysphagia-friendly Food

LI Miaoyuan，LIAO Hongmei*

（College of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China）

Abstract: In order to improve the current situation of malnutrition in people with dysphagia, a kind of low fat, high fiber and high protein soft gels were developed through a thermal induction method, with whey protein, microcrystalline cellulose, sunflower oil, as well as gellan gum and konjac gum. Besides, the physical properties of the soft gels were analyzed using texture analysis, rheological testing and structural characterization. According to the International dysphagia dietary standard initiative (IDDSI), their application potential as dysphagia-friendly food was evaluated. The results showed that soft gels prepared with 4%~8% whey protein, 2%~6% microcrystalline cellulose, 1%~3% sunflower oil, and 2% polysaccharides (a mixture of gellan gum and konjac gum) exhibit excellent moldability, surface gloss, and freeze-thaw stability, meeting IDDSI Level 4 requirements. Increasing microcrystalline cellulose to 4%~6% resulted in a gel with lower strength and enhanced softness and smoothness, facilitated by the hydrogen bonding of higher amounts of cellulose and oil within the polysaccharide network, making it easier to swallow. Overall, the low-fat, high-fiber, high-protein soft gels developed in this study offer a novel dietary option for individuals with dysphagia and hold significant application potential.

Key words: dysphagia; gellan gum; konjac gum; low fat high fiber high protein; soft gel; freezing and reheating

收稿日期: 2025−03−07

基金项目: 校大学生创新训练项目（cxy2024023）; 江苏省大学生创新训练项目（202410295126Y）。

作者简介: 李苗源（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工及贮藏, E-mail: 6220112042@stu.jiangnan.edu.cn。

*** 通信作者:** 廖红梅（1983−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏, E-mail: hmeiliao@jiangnan.edu.cn。

吞咽障碍是指因吞咽功能部位异常，导致食物无法安全有效地从口腔进入胃部的状况[1]。在全世界范围内，约有 8% 的人患有吞咽障碍，这表明每 13 个人中可能有 1 个人无法安全进食[2]。由于进食能力下降、食欲下降和心理压力等因素，吞咽障碍人群特别容易出现营养不良[3]。吞咽障碍人群的食品要求柔软、易吞咽、美味和高营养，目前主要形式为粘稠液体和质地改良的食物泥[4]。已有相关报道，汤宇琪[5] 在鳕鱼鱼糜中添加胡萝卜、山药、麦麸和甲基纤维素等辅料制备了易吞咽鱼肉食团；Xie 等[6] 在桃浆中添加大豆分离蛋白制备吞咽障碍人群饮食。然而，对于吞咽障碍人群食品的探究主要基于原有食物的改良[2]，产品模式单一，存在营养供给不足的问题。在采用质地改良饮食的老年人中有 54% 需要额外营养补充剂[7]。此外，目前的营养补充剂有多种形式，其中凝胶具有成型性好、稳定性强、柔软光滑等特性，适合作为营养物质的载体。因此，制备一种可以补充多种营养的复合软凝胶具有重要意义。

蛋白质、膳食纤维和脂质是维持人体代谢的主要来源，也是日常食物必不可少的组成物质。乳清分离蛋白是优质蛋白质补充剂，不仅含有多种活性成分，还易于消化吸收[8]。微晶纤维素由于其良好的膳食纤维特性，在食品工业中常被作为一种食用纤维和理想的保健食品添加剂[9]。葵花籽油口味清香，富含不饱和脂肪酸，具有很高的营养价值[10]。然而，这些营养物质由于粘度高或液态等性质需要通过其他介质被吞咽障碍人群食用。在吞咽障碍治疗中，多糖因其健康无味、剪切变稀、易溶于水等特性，被广泛应用于液体增稠、食物质地改良及营养复合物制备。Wei 等[11] 用羧甲基化凝乳胶和魔芋葡甘聚糖制备了适用于吞咽障碍患者的营养制剂。Ekonomou 等[12] 用卡拉胶、瓜尔胶、黄原胶、刺槐豆胶和阿拉伯胶开发出 3D 打印的营养餐。侯燕杰[13] 用魔芋胶和黄原胶构建了可应用于吞咽障碍食品的凝胶体系。Hou 等[14] 制备了基于结冷胶和麦醇溶蛋白的 3D 打印吞咽障碍饮食。结冷胶和魔芋胶由于其优良的凝胶特性而广泛用于递送包埋营养物质。但与单一凝胶比较，复配凝胶的持水性、弹性和控释特性更好[15]。因此，以结冷胶和魔芋胶为辅料制备低脂、高纤维、高蛋白的软凝胶具较强可行性。

本研究从吞咽障碍人群的膳食需求出发，以结冷胶、魔芋胶、微晶纤维素、乳清蛋白和葵花籽油为原料，参考 GB/Z 21922-2008《食品营养成分基本术语》和 GB 28050-2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》进行设计，制备了 6 种低脂、高纤维、高蛋白软凝胶；并对不同软凝胶的物理特性进行探究，为吞咽障碍人群专用食品的设计提供全新方案。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

结冷胶、魔芋胶、微晶纤维素　食品级，河南万邦实业有限公司；乳清分离蛋白　纯度为 90%，美国 Hilmar 公司；葵花籽油　食品级，九三食品股份有限公司；溴化钾、氯化钠、尿素、十二烷基硫酸钠（lauryl sodium sulfate，SDS）　分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

JJ-1 电动搅拌机　金坛区荣华仪器制造有限公司；MSY-24 电热恒温水浴锅　上海牧朗仪器制造有限公司；SCIENTZ-18N/C 冻干机　宁波新芝生物科技股份有限公司；CR-400 手持式色度计　日本 Konica Minolta 公司；TA-XT plus 型物性分析仪　英国 Stable Micro System 公司；Discovery HR-3 流变仪　美国 TA Instrument 公司；5804 R 离心机　德国 Eppendorf 公司；MesoMR23-060V-I 低场核磁共振分析仪　上海纽迈电子科技有限公司；Nicolet iS10 傅里叶变换红外光谱仪　美国 Thermo Fisher Scientific 公司；D2 PHASER X 射线衍射仪　德国 Bruker 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 低脂、高纤维、高蛋白软凝胶的设计与制备　基于预实验结果，以 2%（w/w）多糖（1.875% 结冷胶和 0.125% 魔芋胶）为基础，分别添加 4%~8%（w/w）乳清蛋白、2%~6%（w/w）微晶纤维素、1%~3%（w/w）的葵花籽油，可以获得易吞咽的营养凝胶。根据 GB/Z 21922-2008《食品营养成分基本术语》，膳食纤维的能量折算系数为 8 kJ/g，蛋白质为 17 kJ/g，脂肪为 37 kJ/g。通过能量计算设计 6 种凝胶 SG1~SG6（表 1）。根据 GB 28050-2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》，6 种凝胶均满足“≤ 3 g 脂肪/100 g 固体”、“≥3 g 纤维/420 kJ”、“≥6 g 蛋白/420 kJ”，符合低脂肪高纤维高蛋白要求。制备凝胶时，称取相应物质含量的结冷胶、魔芋胶、乳清蛋白、微晶纤维素和葵花籽油于烧杯中，加入蒸馏水，搅拌均匀，90 ℃ 加热 30 min，制得低脂、高纤维、高蛋白软凝胶。将凝胶样品分为两组：常温组，将凝胶冷却至 25 ℃；冷冻-复热组，将凝胶置于−20 ℃ 冷冻 24 h，取出蒸汽加热至中心温度为 70 ℃，冷却至 25 ℃。拍照记录并测定相关指标。

表 1　低脂、高纤维、高蛋白软凝胶设计

Table 1　Design of low fat, high fiber, high protein soft gels

组别	结冷胶（%）	魔芋胶（%）	乳清蛋白（%）	微晶纤维素（%）	葵花籽油（%）	水（%）
SG1	1.875	0.125	10	2	1	85
SG2			8	4	1	
SG3			6	6	1	
SG4			8	2	3	
SG5			6	4	3	
SG6			4	6	3	

1.2.2 色泽测定　使用手持式色度计测量样品的色泽。首先用白板进行标定，将色度计透镜垂直并轻轻固定在样品表面上方，每个样品在不同位置随机测量

三次，以 L^*、a^*和 b^*三个指标表示色泽，计算平均值用于结果分析。其中 L^*(0~100)代表亮度，0 代表黑色样本，100 代表白色样本。a^*正值代表红色，负值代表绿色。b^*正值代表黄色，负值代表蓝色。

1.2.3　凝胶强度和质构测定　参照 Fei 等[16]的方法用物性分析仪测量样品的凝胶强度和质构特性。测试中，将样品放入直径为 40 mm 的容器中并填充至 15 mm 高，分别测试凝胶强度和质构指标。其中，测试凝胶强度时选择 P/0.5R 探头，测试速度 1.0 mm/s，目标深度 10 mm。测试质构时选择 P/25 探头，以 10 mm/s 速度和 10 mm 压缩距离进行两次压缩。

1.2.4　流变特性的测定　使用流变仪分析样品的流变特性。首先选择直径 40 mm 板，设置间隙为 1000 μm，温度为 25 ℃。测量静态流变时，选择 flow sweep 模式，将剪切速率设置为 0.1~100 1/s，获得样品的表观粘度(η)随剪切速率的变化曲线；测量动态流变时，选择 Frequency sweep 模式、0.1~16 Hz 的频率区间、1% 的应变，获得样品的储能模量(G')和损耗模量(G")和损耗因子(Tanδ)随角频率的变化曲线。

1.2.5　持水性、解冻损失率和蒸煮损失率的测定　参照 Xie 等[6]的方法测定持水性。称取 3 g 样品在 25 ℃ 下以 8000 r/min 离心 10 min，用滤纸擦去表面水分，称取重量，计算公式如下：

$$WHC(\%) = \frac{M_1}{M_0} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中：WHC 表示持水性，%；M_0 表示样品的初始质量，g；M_1 表示经 8000 r/min 离心 10 min 后的样品质量，g。

参照 Lu 等[17]的方法测定析水率。将样品于 −20 ℃ 冷冻 24 h 后取出，解冻至室温，用滤纸擦去表面水分，称取重量，计算公式如下：

$$X(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \qquad 式（2）$$

式中：X 表示析水率，%；M_0 表示解冻前的样品质量，g；M_1 表示解冻后的样品质量，g。

参照 Lu 等[17]的方法测定蒸煮损失率。将样品 −20 ℃ 冷冻 24 h，蒸汽加热至中心温度为 70 ℃，用滤纸擦干表面水分后称重，计算公式如下：

$$X(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \qquad 式（3）$$

式中：X 表示蒸煮损失率，%；M_0 是蒸煮前的样品重量，g；M_1 是蒸煮后的样品重量，g。

1.2.6　结构特性的测定

1.2.6.1　水分分布　根据 Zou 等[18]的方法测定样品中水分分布，略有改动。将 3 g 样品用防水膜包好，然后放入直径 15 mm 的圆柱形核磁玻璃管中。将玻璃管插入于低场核磁共振分析仪中，设置参数为：序列为 Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)序列，温度为 32 ℃，频谱宽度(SW)为 200 kHz，接收器增益(RG)为 20 dB，回波数(NECH)为 16000，弛豫衰减时间(TE)为 0.5 ms，重复扫描数(NS)为 2，重复间隔(TW)为 3500 ms。

1.2.6.2　红外光谱　参照 Liu 等[19]的方法。将样品冻干，获得冻干粉。将 1 mg 冻干粉与 100 mg 溴化钾混合，在玛瑙研钵中研磨，制备粉末压片。通过傅立叶红外光谱仪扫描样品，温度为 25 ℃，扫描范围设置为 400~4000 cm^{-1}，扫描次数为 32 次。

1.2.6.3　X 射线衍射　参照 Ji 等[20]的方法，稍有改动。将样品的冻干粉置于 X 射线衍射仪中，以 5°~60°(2θ)的扫描范围、0.05°/min 的速度测试。

1.2.6.4　分子作用力　根据 Liu 等[19]的方法分析凝胶中分子作用力，略有改动。在凝胶制备过程中，分别加入氯化钠(0、0.5、1、2 mol/L)、尿素(0、0.1、0.5、2 mol/L)和 SDS(0、0.01、0.05、0.1 mol/L)并制备凝胶。参考 1.2.3 分析所得凝胶的凝胶硬度，并分别分析静电相互作用、氢键和疏水相互作用对复合凝胶的贡献度。

1.2.7　IDDSI 测评　依据国际吞咽障碍者膳食标准化委员会(International Dysphagia Diet Standardization Initiative, IDDSI)制定的 IDDSI 框架，将食品共分为 8 个级别(0~7 级)，包括从完全液态到完全固态的食品质地[21]。通过汤匙倾斜测试来测评等级，舀取一汤匙样品，观察样品在勺子上的状态；然后将汤匙缓慢地向侧面倾斜，观察样品的滑落状态以及样品滑落后勺子的表面食物残留状态。

1.3　数据处理

所有处理重复 3 次，数据用平均值±相对标准偏差表示。采用 Excel 2016 软件进行数据分析，并用 Origin 2018 作图。采用 IBM SPSS Statistics 23 软件对数据进行显著性分析，$P<0.05$ 为具有显著性差异。

2　结果与分析

2.1　软凝胶的外观、凝胶强度和色泽特性

凝胶的外观与色泽是影响消费者接受度的重要因素。如图 1A 所示，常温组样品 SG1~SG6 可形成凝胶，其中样品 SG6 成型性较差。对常温组样品进行冷冻-复热处理后，相比油脂和纤维低的样品 SG1、SG2、SG4，油脂和纤维高的样品 SG3、SG5、SG6 发生轻微形变。如图 1B 所示，在常温组中，油脂浓度为 1% 时，样品 SG1、SG2、SG3 的凝胶强度无显著差异($P>0.05$)；油脂浓度为 3% 时，样品 SG4 的凝胶强度大于样品 SG5 和 SG6($P<0.05$)，而后二者无差别($P>0.05$)。在蛋白浓度一定时，样品 SG2、SG4 和样品 SG3、SG5 的凝胶强度无显著差异($P>0.05$)。冷冻-复热后，样品的凝胶强度无明显变化。这说明蛋白支持了凝胶网络的形成[22]，油脂和纤维素使凝胶网络松散[23]。

如图 1C 所示，在常温组中，油脂浓度为 1% 时，

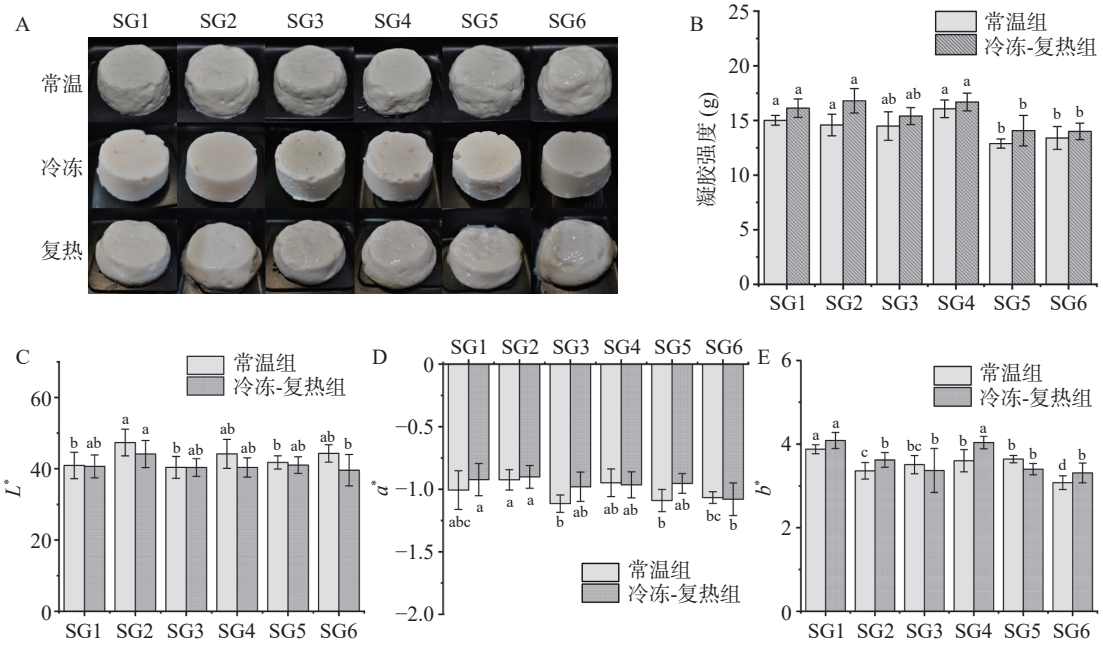


图 1 低脂、高纤维、高蛋白软凝胶的外观(A)、凝胶强度(B)和色泽特性(C、D 和 E)

Fig.1 Appearance (A), gel strength (B) and color properties (C, D and E) of low fat, high fiber, high protein soft gels

注: 不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

随着纤维素浓度从 2% 增至 4%, 样品的 L^*显著增加(P<0.05), 此时纤维素的均匀分散增强了光的散射; 而纤维素浓度继续增加至 6% 时, 样品 L^*显著降低(P<0.05), 此时凝胶可能更加致密, 导致部分光线被吸收。油脂浓度为 3% 时, 样品 SG4、SG5、SG6 的 L^*无显著性差异(P>0.05)。如图 1D、图 1E 所示, 油脂浓度为 1% 时, 随着纤维素浓度从 2% 增至 4%, 样品的 a^*无显著变化(P>0.05), b^*显著降低(P<0.05); 纤维素浓度继续增加至 6% 时, 样品的 a^*显著降低(P<0.05), b^*无显著变化(P>0.05)。油脂浓度为 3% 时, 随着纤维素浓度的增加, 样品的 a^*无变化(P>0.05), b^*在纤维素浓度增至 6% 时降低(P<0.05)。在相同蛋白浓度下, 样品 SG3、SG5 的 a^*和 b^*无差异(P>0.05)。因此, 多糖与蛋白构成的凝胶纤维网络主导了凝胶的呈色效应, 束缚于其中的油脂与纤维素由于凝胶网络的屏蔽作用, 对整体色泽影响微弱。

2.2 软凝胶的质构特性

适用于吞咽障碍患者的饮食应具有低硬度、低黏附性和高内聚性的特性需求。如表 2 所示, 所有样品的硬度在 1000~2500 N/m^2 范围内, 符合无需咀嚼的饮食的硬度要求[24]。在常温组中, 油脂浓度一定时, 随着纤维素浓度增加、蛋白浓度减小, 样品(SG1~SG3 与 SG4~SG6)的硬度呈减小趋势, 说明其更加柔软。同时样品的黏附性减小, 具体表现为样品光滑度提升。而相比样品 SG5, 样品 SG6 的硬度和黏附性较高, 说明随着油脂和纤维素浓度的增加, 凝胶内的相互作用可能增强。所有样品的内聚性均维持在 60%~75% 的较高水平, 显著优于既往研究中吞咽障碍适用鱼糜制品的内聚性指标(30%~50%)[25], 这种高内聚性特征可有效降低软凝胶在吞咽过程中

表 2 低脂、高纤维、高蛋白软凝胶的质构特性

Table 2 Texture properties of low fat, high fiber, high protein soft gels

样品		硬度(N/m^2)	黏附性(g·s)	回复性(%)	内聚性(%)	弹性(%)	胶着性(N/m^2)	咀嚼性(N/m^2)
常温组	SG1	1691.9±53.2^a	44.1±1.1^a	23.2±0.6^a	71.0±1.4^a	84.9±0.6^{ab}	1201.8±40.4^a	1019.6±29.0^a
	SG2	1461.0±68.1^b	44.9±1.2^a	21.7±0.3^a	71.5±1.8^a	85.0±0.3^a	1043.4±36.2^b	886.9±29.7^b
	SG3	1409.0±21.0^b	38.5±2.3^b	19.5±1.5^b	68.6±4.0^{ab}	84.1±0.6^b	966.7±70.7^{bc}	812.4±55.6^{bc}
	SG4	1604.4±141.0^a	43.1±1.6^a	21.9±0.5^a	72.2±1.5^{ab}	84.9±0.3^{ab}	1157.4±84.3^a	981.9±68.5^a
	SG5	1245.1±24.3^c	37.2±1.3^b	21.7±0.3^a	71.7±1.3^{ab}	84.1±0.6^b	892.4±5.2^c	750.0±2.2^c
	SG6	1379.0±87.7^{bc}	39.5±1.3^b	17.8±0.7^c	69.2±3.0^{ab}	85.2±0.5^a	952.2±33.1^{bc}	810.9±23.7^{bc}
冷冻-复热组	SG1	2016.0±143.1^a	49.1±4.4^{ab}	17.8±0.1^a	67.3±4.9^a	86.3±0.3^a	1352.6±71.7^b	1167.0±60.0^b
	SG2	2129.6±124.4^a	53.0±3.7^a	15.7±0.4^c	68.5±5.3^a	87.7±1.0^a	1454.9±36.7^a	1276.4±44.9^a
	SG3	1749.9±117.7^b	52.0±2.4^{ab}	16.1±0.9^c	68.2±4.1^a	86.8±0.3^a	1190.4±50.3^c	1032.8±42.0^c
	SG4	2021.5±58.9^a	54.5±2.7^a	17.4±0.6^{ab}	69.6±1.9^a	86.8±1.2^a	1406.2±31.4^{ab}	1220.5±42.2^{ab}
	SG5	1698.2±113.9^b	51.0±3.2^{ab}	16.6±0.7^{bc}	68.0±5.6^a	86.4±1.7^a	1151.3±23.7^c	994.9±2.7^c
	SG6	1692.6±158.4^b	46.5±1.6^b	14.1±0.3^d	68.2±3.5^a	86.4±0.3^a	1150.48±62.45^c	994.4±50.74^c

注: 同一列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

的分散风险[26]。胶着性和咀嚼性反映食团在口腔咀嚼过程中所消耗的能量。油脂浓度一定时，样品（SG1~SG3 与 SG4~SG6）的胶着性和咀嚼性均随纤维素浓度的增加而呈减小趋势，说明咀嚼消耗能量减少，而样品 SG6 的胶着性和咀嚼性相比样品 SG5 较高，说明样品 SG6 凝胶结构可能更致密。良好的回复性和弹性有助于样品在外力作用下保持稳定。各样品的弹性指标均在 80%~90% 范围内，表明所制备的软凝胶具有稳定的三维网状结构。冷冻-复热后，样品的硬度、黏附性、胶着性和咀嚼性均呈现增加趋势，这表明冷冻-复热处理可能会增强分子间相互作用。结果表明，软凝胶具有良好的自支撑性和凝聚性，其中高蛋白软凝胶机械强度较高，可能会残留口腔并增加咀嚼消耗；高纤维软凝胶的机械强度较低，柔软光滑，容易吞咽。Liu 等[19] 得出了相似的结论，他们发现黄原胶和豌豆蛋白之间的相容性会间接增加蛋白质的浓度，从而形成机械强度更高的凝胶。

2.3　软凝胶的流变特性

图 2 为软凝胶样品的流变特性。图 2A 表明，所有样品均呈现显著的剪切变稀特性，这表明软凝胶在口腔静息状态时保持高粘度的稳定形态，在吞咽动作引发剪切作用时粘度迅速下降，这种动态响应特性有助于延长神经肌肉系统的反射响应时间，促使会咽及时地封闭气管入口，从而降低误吸风险[19]。Liu 等[19] 用黄原胶和罗勒籽胶制备的吞咽障碍人群专用饮食具有相似的结果。此外，样品的表观粘度随着纤维素浓度（2%~6%）的增加而减小，说明纤维素可能削弱凝胶网络的交联，这一结果与质构结果相吻合。

由图 2B、图 2C 所示，在测试频率范围（0.1~16 Hz）内所有样品的 G'值始终高于 G"值，表明其类固体凝胶特性[2]。油脂浓度一定时，相比低纤维素（2%）样品，高纤维素（4%~6%）样品的 G'和 G"值较小，说明纤维素对凝胶网络强度的削弱具有浓度依赖性。蛋白浓度一定时，随着纤维素增加、油脂减少，样品的 G'和 G"值增加，可能因为纤维素的空间位阻效应对凝胶强度的提升大于油脂的界面稳定效应。由图 2D 可知，所有样品的 tanδ 均稳定在 0.1~0.3 范围内，表明其为弹性更强的软凝胶。此外，冷冻-复热处理后，样品仍具有剪切变稀特性，且表观粘度和 tanδ 无明显变化，表明其凝胶网络结构具有较好的冷冻-复热耐受性。因此，六组样品均为吞咽适应性良好的软凝胶，油脂与纤维素均能够有效提升软凝胶的柔软度，其中纤维素在增强凝胶强度方面表现出更显著的效果，这与 Li 等[27] 的研究结果相似。

2.4　软凝胶的持水性、析水率和蒸煮损失率

患有吞咽障碍的人经常会遇到口干等挑战，因此保水性能和烹饪稳定性是评估吞咽软食的重要参数[16]。如图 3A 所示，六组样品的持水性均维持在 93% 以上，相比以往研究的吞咽障碍人群专用食品表现出更优异的持水性能，这有助于软凝胶在咀嚼过程中保持结构完整性，降低细小颗粒进入气管而导致的误吸的风险[6]。六组样品的析水率（≤5.64%）和蒸煮损失率（≤7.24%）低于传统虾糜凝胶的析水率（22.95%）和蒸煮损失率（50.48%）[17]，说明其具有优良的冷冻-复热耐受性。油脂浓度为 1% 时，随着纤维素增加、蛋白减少，样品的蒸煮损失率呈增加趋势，析水率没有明显变化；油脂浓度为 3% 时，样品的析水率和蒸煮损失率逐渐增加。然而，在相同的蛋白

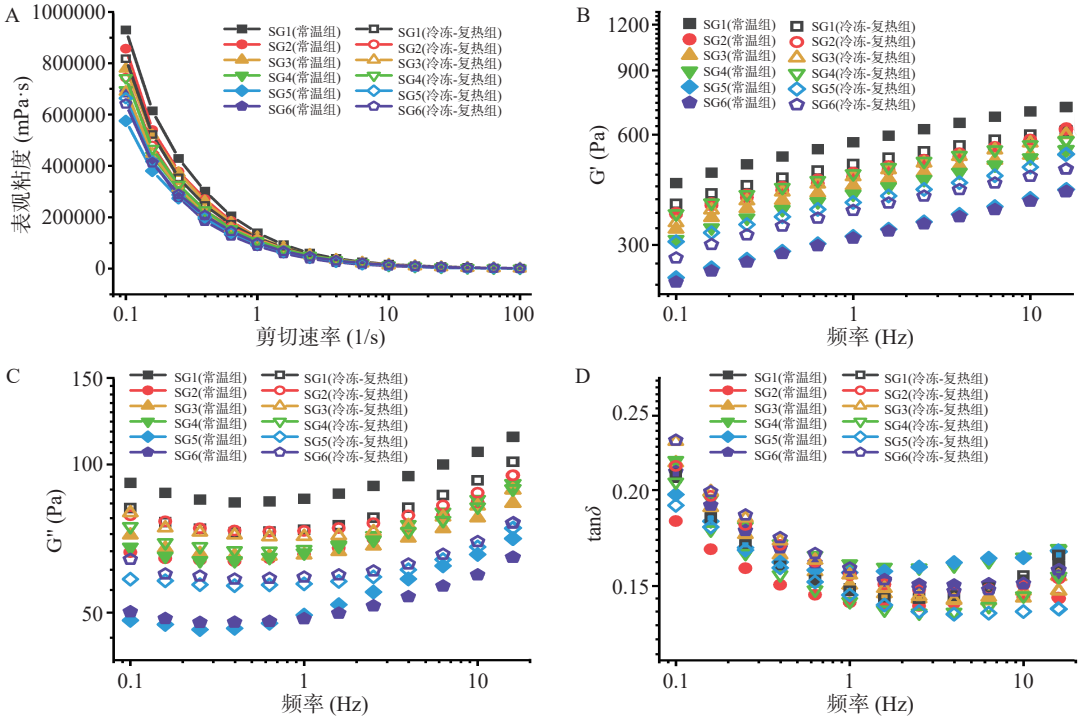


图 2　低脂、高纤维、高蛋白软凝胶的流变特性

Fig.2　Rheological properties of low fat, high fiber, high protein soft gels

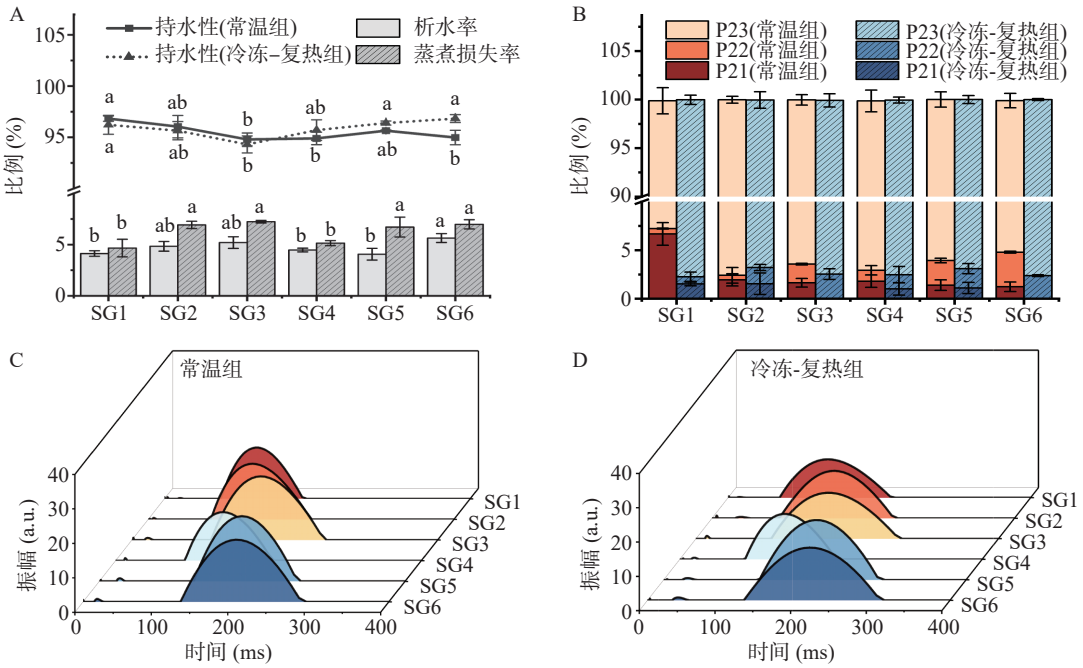


图 3 低脂、高纤维、高蛋白软凝胶的持水性、析水率和蒸煮损失率(A)、T2 弛豫时间峰面积比例(B)和 T2 弛豫时间反演图(C 和 D)

Fig.3 Water holding capacity, water extraction rate and cooking loss rate (A), T2 relaxation time peak area ratio (B) and T2 relaxation time inversion diagram (C and D) of low fat, high fiber, high protein soft gels

注: 不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

浓度下, 随着油脂和纤维素浓度的变化, 样品的持水性、析水率和蒸煮损失率无明显变化(P>0.05)。结果表明, 软凝胶的保水性能主要依赖于蛋白-多糖的交联网络, 填充于凝胶网络空隙中的纤维和油脂对软凝胶保水性能的影响微弱。

2.5 软凝胶的结构特性

2.5.1 软凝胶的水分分布 基于低场核磁共振技术解析的水分子状态分布(图 3B~图 3D)进一步揭示了软凝胶的持水机制。软凝胶体系存在 3 个特征峰: T_{21} 弛豫组分(0~10 ms)表示凝胶网络中通过氢键紧密结合的水, T_{22} 组分(10~100 ms)表示受网络结构限制的固定水, T_{23} 组分(100~1000 ms)表示具有高流动性的自由水。P_{21}、P_{22}、P_{23} 分别表示软凝胶水分体系中不同 T_{21}、T_{22}、T_{23} 组分的占比。所有样品均在 T_{23} 区域呈现单一主峰(P_{23}≥92.64%), 说明体系中的大部分水为自由水[28]。当油脂浓度为 1% 时, 随着纤维素增加、蛋白减少, 样品的弛豫时间增加, P_{21} 下降而 P_{22} 和 P_{23} 增加; 而当油脂提高到 3% 时, 样品的弛豫时间延长, P_{21} 和 P_{23} 下降, 而 P_{22} 增加。表明纤维素可能干扰蛋白质和多糖的相互作用, 导致凝胶结构疏松[29], 并通过氢键和疏水作用结合油脂、多糖和蛋白重新构建凝胶网络[30], 增加固定水以维持凝胶形态; 蛋白减少导致蛋白质与多糖凝胶网络的氢键结合位点减少, 凝胶结构松散。经冷冻-复热后, 样品的弛豫时间峰值减小, 说明冷冻-复热处理使体系内水分减少。结果表明, 纤维素可能通过削弱和自组装的双重作用促进形成柔软稳定的软凝胶。

2.5.2 软凝胶的傅里叶变换红外光谱 图 4 为软凝胶的傅里叶红外光谱图。3100~3400 cm^{-1} 范围内的宽吸收峰为-OH 伸缩振动, 代表氢键的响应[23]。油脂浓度相同时, 随着纤维素增加、蛋白减少, 样品-OH 吸收峰对应的波数减小, 即氢键增强, 表明纤维素可

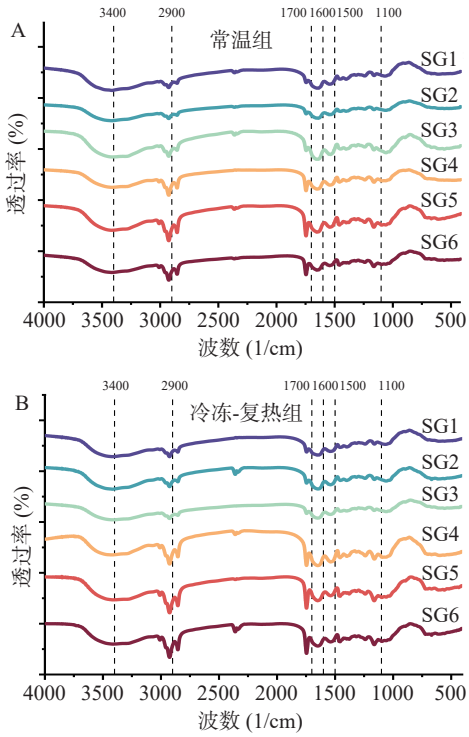


图 4 低脂、高纤维、高蛋白软凝胶的红外光谱图

Fig.4 Infrared spectrum of low fat, high fiber, high protein soft gels

能通过氢键形成补充性凝胶网络。样品在 3009、2926、1744、1160 cm^{-1} 处的峰分别代表了不饱和碳的 C-H 伸缩振动、饱和碳的 C-H 伸缩振动、酯羰基 C=O 伸缩振动、甘油三酯的 C-O 伸缩振动，相比低油脂样品 SG1~SG3，高油脂样品 SG4~SG6 在这些波数下的峰强度更高。样品在 1640 cm^{-1} 和 1540 cm^{-1} 处的峰代表的蛋白的酰胺 I 和 II 条带[31]。

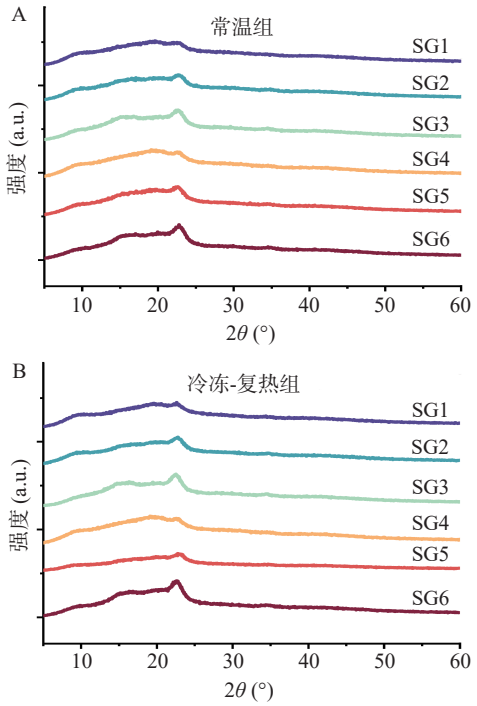


图 5　低脂、高纤维、高蛋白软凝胶的 X 射线衍射图谱

Fig.5　X-ray diffraction of low fat, high fiber, high protein soft gels

随着纤维素浓度的增加，样品的酰胺 I 带对应波数增大，说明纤维素可能导致蛋白-多糖凝胶网络松散。冷冻-复热后，样品的-OH 吸收峰无明显变化，酰胺 I 带对应波数增大（样品 SG5、SG6 除外）、酰胺 II 带对应波数减小，说明冷冻-复热导致蛋白构象变化，这与 Hellebois 等[32] 的研究结果相似。因此，纤维素可能干扰蛋白-蛋白的相互作用，同时通过氢键作用重新构建凝胶网络，这与核磁共振的结果相吻合。

2.5.3　软凝胶的 X 射线衍射　图 5 为复合营养体系的 X 射线衍射谱图。所有样品的 X 射线衍射图谱中在 2θ 为 10°、15°和 22°时均出现衍射峰，说明样品为多相复合体系。由图 5A 可知，在常温组中，油脂浓度一定时，随着纤维素增加、蛋白减少，样品（SG1~SG3与 SG4~SG6）在 10°处的宽弥散峰无明显变化，而 15°处宽弥散峰以及 22°处尖锐峰的强度增加，可能因为蛋白减少导致凝胶网络疏松，无定形度增加[20]；纤维素通过分子间氢键或疏水相互作用形成局部有序结构，与红外光谱得出的氢键强化相吻合。在蛋白浓度一定时，随着纤维素增加、油脂减少，样品在 15°和 22°的衍射峰强度增加，可能因为纤维素干扰了蛋白-多糖凝胶网络的形成，同时通过自组装形成有序结构[23]。由图 5B 可知，冷冻-复热后，样品的衍射峰无明显变化，证实软凝胶网络具有良好的冷冻-复热稳定性。因此，纤维素可能通过削弱和自组装的双重作用结合在凝胶网络中。

2.5.4　软凝胶的分子作用力　研究表明，氯化钠、尿素和 SDS 可以分别破坏分子之间的静电相互作用、氢键和疏水相互作用[19]。因此，通过评价不同浓度化

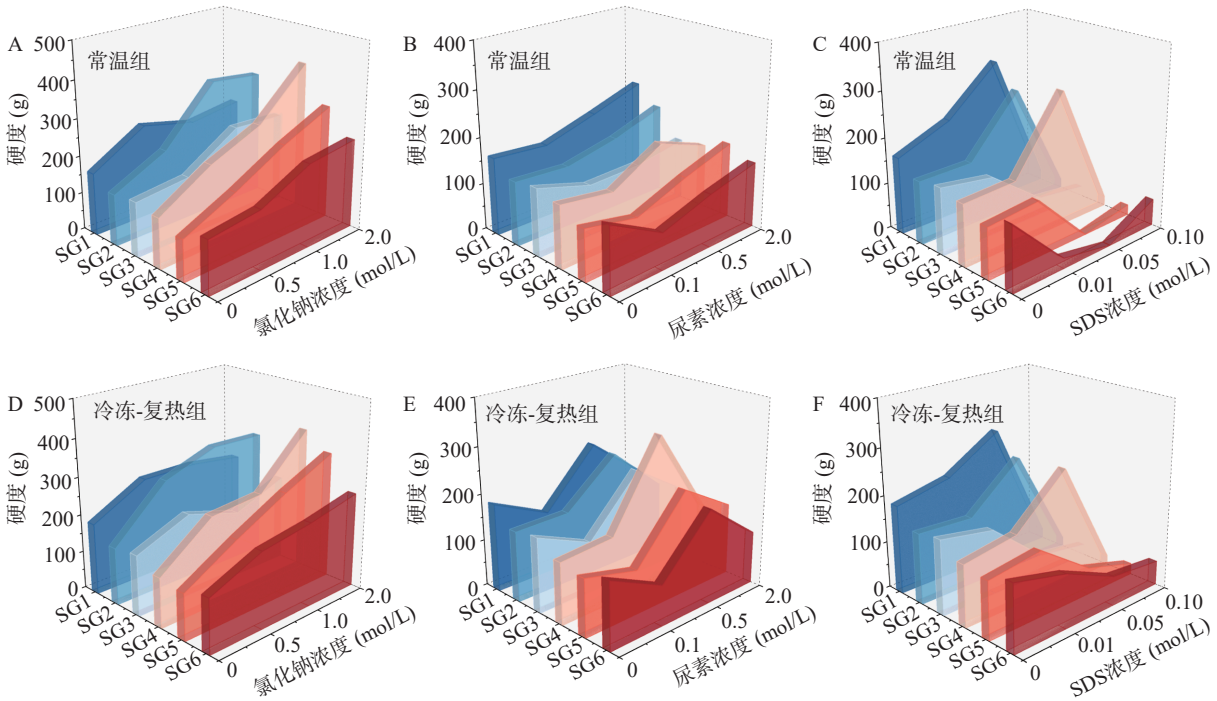


图 6　不同浓度氯化钠（A 和 D）、尿素（B 和 E）和十二烷基硫酸钠（SDS）（C 和 F）对低脂、高纤维、高蛋白软凝胶硬度的影响

Fig.6　Effects of sodium chloride (A and D), urea (B and E) and lauryl sodium sulfate (SDS) (C and F) at different concentrations on the hardness of low fat, high fiber, high protein soft gels

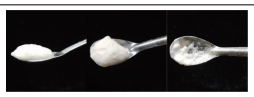
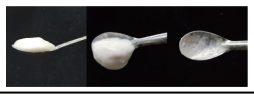
学试剂对凝胶硬度的影响可以评估维系凝胶结构的物理作用力[33]。如图 6A、图 6D 所示，0.5~2 mol/L 氯化钠增加了所有样品的硬度，说明静电相互作用可能不是软凝胶内的主要分子作用力。如图 6B、图 6E 所示，在尿素（0.1~2.0 mol/L）处理组中，添加 0.1 mol/L 尿素后，六组样品的硬度均显著减小，其中低纤维素（2%）样品硬度减小约 12.79%，高纤维素（4%~6%）样品的硬度减小约 44.27%，这说明纤维素可能主要通过氢键结合在凝胶基质中[34]。如图 6C、图 6F 所示，在 SDS（0.01~0.1 mol/L）处理组中，样品 SG1、SG2、SG4 在 0.1 mol/L SDS 作用下出现硬度减小趋势，而样品 SG3、SG5、SG6 在 0.01 mol/L SDS 作用下出现硬度减小趋势，说明蛋白通过一定的疏水相互作用形成凝胶网络，纤维和油脂可能会减弱蛋白间的疏水相互作用。此外，随着 SDS 浓度的增加，样品 SG1、SG2 和 SG4 的硬度呈现先增加后减小趋势，可能因为低浓度 SDS 通过结合疏水位点而增强了凝胶网络结构，高浓度 SDS 破坏了疏水作用，这与吴岑琳[35] 的研究一致。冷冻-复热后，尿素处理组样品的硬度增加，可能因为冷冻-复热过程中形成的冰晶导致软凝胶局部氢键密度增加。因此，维系软凝胶的主要作用力为氢键和疏水相互作用。

2.6 软凝胶的 IDDSI 测评

表 3 为软凝胶的勺倾测试结果。在常温组和冷冻-复热组中，样品 SG1~SG6 均可以用勺子舀起并在勺子上固定形状，同时容易从倾斜的勺子上以团状滑落，在勺子上残留极少，符合 IDDSI 4 级糊状。此外，在油脂浓度一定时，纤维素含量高（4%~6%）的样品相较于纤维素含量低（2%）样品在勺子上的残留更少；油脂含量高（3%）的样品 SG4~SG6 相较于油脂含量低的样品 SG1~SG3 更容易从勺上滑落。这说明纤维素和油脂含量高的软凝胶更光滑、容易吞咽[30]，这与质构结果相吻合。冷冻-复热处理后，样品在勺上的残留减少，可能因为冷冻-复热处理导致凝胶内部键增强而不易分散。因此，纤维素和油脂有助于形成易吞咽的软凝胶，冷冻-复热可以改善凝胶的吞咽特性。

表 3 低脂、高纤维、高蛋白软凝胶的 IDDSI 测评

Table 3 IDDSI evaluation of low fat, high fiber, high protein soft gels

样品	常温组	IDDSI等级	冷冻-复热组	IDDSI等级
SG1		4		4
SG2		4		4
SG3		4		4
SG4		4		4
SG5		4		4
SG6		4		4

3 结论

针对当前吞咽障碍患者专用食品种类单一、营养供给不足的问题，本文创新性地研制了可以补充多种营养素的吞咽障碍患者专用软凝胶。结果表明，以乳清蛋白、微晶纤维素、葵花籽油、结冷胶和魔芋胶为原料制备的六组样品具有优良的成型性、适口性和冷冻-复热耐受性，可归类为 IDDSI 4 级。软凝胶可以提供 6%~10% 的优质蛋白、2%~6% 的纤维素和 1%~3% 的油脂，其配比符合“低脂肪高纤维高蛋白”。当纤维素浓度为 4%~6% 时，纤维素可以干扰蛋白质和多糖的相互作用，增加凝胶内部水流动性，使软凝胶更柔软光滑，易于吞咽；同时纤维素通过氢键和疏水相互作用重新构建了凝胶网络，有助于维持软凝胶的结构稳定性。冷冻-复热处理后，软凝胶仍适用于吞咽障碍人群食用。综上所述，本文研制的低脂、高纤维、高蛋白软凝胶具有作为吞咽障碍患者优质营养补充剂的潜力。此外，本文通过全质构和流变仪剪切模拟口腔咀嚼，通过汤匙倾斜模拟咽部食物滑落，但仍不能全面系统地模拟吞咽障碍患者的吞咽过程。更加科学全面的吞咽特性评价体系仍需进一步探索。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] METHACANON P, GAMONPILAS C, KONGJAROEN A, et al. Food polysaccharides and roles of rheology and tribology in rational design of thickened liquids for oropharyngeal dysphagia: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 4101−4119.

[2] 王馨. 基于 IDDSI 框架的淀粉基吞咽障碍食品质地评价及消化特性研究[D]. 南昌：南昌大学, 2023. [WANG X. Texture evaluation and digestion properties of starch-based dysphagia food based on IDDSI framework[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]

[3] CARTAGENA M, GIURA L, ANSORENA D, et al. A texture-modified dessert with high nutritional value designed for people with dysphagia: effect of refrigeration and frozen storage[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(1): 462−471.

[4] RAHEEM D, CARRASCOSA C, RAMOS F, et al. Texture-modified food for dysphagic patients: A comprehensive review[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(10): 5125.

[5] 汤宇琪. 易吞咽鱼肉配方食团的制备及特性研究[D]. 天津：天津科技大学, 2023. [TANG Y Q. Preparation and characteristic research of easy fish-meat formula bolus to swallow[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2023.]

[6] XIE J, BI J F, NICOLAS J, et al. Dysphagia food: Impact of soy protein isolate (SPI) addition on textural, physicochemical and microstructural properties of peach complex gels[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 154: 110130.

[7] WRIGHT L, COTTER D, HICKSON M. The effectiveness of targeted feeding assistance to improve the nutritional intake of elderly dysphagic patients in hospital[J]. Journal of Human Nutrition and Dietetics, 2008, 21(6): 555−562.

[8] WANG Y S, ZHAO J, LIU C Q, et al. Influence of γ-aminobutyric acid on gelling properties of heat-induced whey protein gels[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 287−293.

[9] JIN X Q, QU R J, WANG Y, et al. Effect and mechanism of acid-induced soy protein isolate gels as influenced by cellulose nanocrystals and microcrystalline cellulose[J]. Foods, 2022, 11(3): 461.

[10] ROMANIĆ R S, LUŽAIĆ T Z, RADIĆ B Đ. Enriched sunflower oil with omega 3 fatty acids from flaxseed oil: Prediction of the nutritive characteristics[J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 150: 112064.

[11] WEI Y Y, GUO Y L, LI R Q, et al. Rheological characterization of polysaccharide thickeners oriented for dysphagia management: *Carboxymethylated curdlan*, konjac glucomannan and their mixtures compared to xanthan gum[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106198.

[12] EKONOMOU S I, HADNADEV M, GIOXARI A, et al. Advancing dysphagia-oriented multi-ingredient meal development: Optimising hydrocolloid incorporation in 3D printed nutritious meals [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109300.

[13] 侯燕杰. 适用于吞咽障碍食品开发的葡甘露聚糖基凝胶体系构建和表征[D]. 南昌：南昌大学, 2023. [HOU Y J. Construction and characterization of glucomannans based gel systems suitable for development of food for dysphagia[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]

[14] HOU Y T, SUN Y D, ZHANG P J, et al. Development and characterization of emulsion gels prepared via gliadin-based colloidal particles and gellan gum with tunable rheological properties for 3D printed dysphagia diet[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126839.

[15] BASAK S, SINGHAL R S. Composite hydrogels fabricated from konjac glucomannan and gellan gum: Rheological characterization and their potential application in sustainable agriculture[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 336: 122091.

[16] FEI S Y, LI Y, LIU K J, et al. Salmon protein gel enhancement for dysphagia diets: Konjac glucomannan and composite emulsions as texture modifiers[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258: 128805.

[17] LU M X, ZHANG C, CHEN B Y, et al. Improvement of gelation properties of *Penaeus vannamei* surimi by magnetic field-assisted freezing in combination with curdlan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 257: 128323.

[18] ZOU X Q, ZHENG L, JIANG B Z, et al. Effect of three soluble dietary fibers on the properties of flaxseed gum-based hydrogels: A comparison study and mechanism illustration[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109458.

[19] LIU Z B, CHEN X, DAI Q Y, et al. Pea protein-xanthan gum interaction driving the development of 3D printed dysphagia diet[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108497.

[20] JI X, XIONG Y L, JIANG J. Tunable rice protein starch composite soft gels: Structural role of ultrasound-modified protein[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109462.

[21] CICHERO J A Y, LAM P T L, CHEN J S, et al. Release of updated International Dysphagia Diet Standardisation Initiative framework (IDDSI 2.0)[J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(1): 195−196.

[22] 王翠娜. 聚合乳清蛋白与多糖相互作用对其凝胶特性影响及应用[D]. 长春：吉林大学, 2015. [WANG C N. Interactions between polymerized whey protein and polysaccharides and its impact on the gelation properties and application[D]. Changchun: Jilin University, 2015.]

[23] 韩甜甜. 大豆分离蛋白和多糖基凝胶油脂的制备及应用研究[D]. 南昌：南昌大学, 2023. [HAN T T. Preparation and application of oleogel based on soybean protein isolate and polysaccharides[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]

[24] WONG M C, CHAN K M K, WONG T T, et al. Quantitative textural and rheological data on different levels of texture-modified food and thickened liquids classified using the International Dysphagia Diet Standardisation Initiative (IDDSI) guideline[J]. Foods, 2023, 12(20): 3765.

[25] OKITA A, TAKAHASHI K, ITAKURA M, et al. A novel soft surimi gel with functionality prepared using alcalase for people suffering from dysphagia[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128641.

[26] XING X B, CHITRAKAR B, HATI S, et al. Development of black fungus-based 3D printed foods as dysphagia diet: Effect of gums incorporation[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107173.

[27] LI Y, XU Z Q, SUN J X, et al. Effects of an inulin and microcrystalline cellulose hybrid hydrogel on the short-term low temperature storage characteristics of pork sausage models[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108572.

[28] QIU L Q, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Investigation of 3D printing of apple and edible rose blends as a dysphagia food[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108184.

[29] YIN T, YAO R, ULLAH I, et al. Effects of nanosized okara dietary fiber on gelation properties of silver carp surimi[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 111: 111−116.

［30］ LIANG W, WANG Y H, LI C, et al. Development of easy-to-swallow and lipid-enhanced 3D printed surimi based on high internal phase emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 155: 110207.
［31］ 张喜瑞. 多糖-蛋白基微乳液凝胶颗粒对油脂消化性的抑制机理及应用研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2024. ［ZHANG X R. The inhibition mechanism of polysaccharide-protein-based emulsion micro-gel particles on lipid digestibility and its application[D]. Yantai: Yantai University, 2024.］
［32］ HELLEBOIS T, GAIANI C, CAMBIER S, et al. Exploration of the co-structuring and stabilising role of flaxseed gum in whey protein isolate based cryo-hydrogels[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 289: 119424.
［33］ 李晶. 冷冻影响脱乙酰魔芋葡甘聚糖凝胶的机制与应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014. ［LI J. The impact mechanism of freezing process on deacetylated koniac glucomannan gel and its application[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.］
［34］ KONTOGIORGOS V, VAIKOUSI H, LAZARIDOU A, et al. A fractal analysis approach to viscoelasticity of physically cross-linked barley β-glucan gel networks[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2006, 49(2): 145−152.
［35］ 吴岑琳. 冷冻魔芋葡甘聚糖基复合凝胶保水性和质构特性的调控研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. ［WU C L. Study on the regulation of water retention capacity and texture property of frozen composite konjac glucomannan[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.］